

14 FEB 2005



REC'D 02 OCT 2003

WIPO PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 37 335.3

Anmeldetag: 14. August 2002

Anmelder/Inhaber: Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

Bezeichnung: Verfahren und Anordnung zum Entwurf eines
technischen Systems

IPC: G 06 F 17/50

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 29. August 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Letenq

Beschreibung**Verfahren und Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems.**

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems.

10

Für den Entwurf eines komplexen technischen Systems ist es oftmals notwendig, dieses System bezüglich mehrerer, einander widersprechender Kriterien zu optimieren. Diese Kriterien beeinflussen Zielfunktionen des Systems, wie z.B. Herstellungskosten oder Wirkungsgrad. Darüber hinaus können mögliche Arbeitspunkte des Systems noch durch Nebenbedingungen eingeschränkt sein. Dies führt zu dem Problem, eine Menge an optimalen Arbeitspunkten für das System zu bestimmen, d.h. die Menge von möglichen Arbeitspunkten des System, bei denen es nicht möglich ist, diese Arbeitspunkte gleichzeitig bezüglich aller Kriterien weiter zu optimieren. Aus dieser Menge an optimalen Punkten kann sich dann ein Anwender unter Berücksichtigung von geheimen Kriterien oder Expertenwissen die für seine Anwendung am besten geeigneten Arbeitspunkte des Systems auswählen.

15

20

30

Aus [1] ist eine Wichtungsmethode zur Optimierung technischer Systeme bezüglich mehrerer Kriterien bekannt, bei der mit Hilfe von Skalierungsparametern Transformationen auf skalarwertige Optimierungsprobleme angewandt werden. Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass es numerisch sehr aufwendig ist, da sehr viele skalarwertige Optimierungen durchgeführt werden müssen. Darüber hinaus erfordert die Auswahl und Variation der Skalierungsparameter eine Interaktion mit einem Benutzer und ist diesbezüglich nicht automatisierbar.

35

In [2] ist eine stochastische Methode zur Optimierung technischer Systeme bezüglich mehrerer Kriterien beschrieben, bei der eine stochastische Differentialgleichung zur Lösung des

Optimierungsproblems verwendet wird. Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass es numerisch sehr aufwendig ist, da eine Vielzahl an quadratischen Optimierungsproblemen gelöst werden muss. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass bei dieser
5 Methode die einzelnen Zielfunktionen nicht gewichtet werden, wodurch dem Anwender wichtige Informationen zur Auswahl eines optimalen Punktes nicht zur Verfügung stehen.

Aus [3] ist eine Homotopiemethode zur Optimierung technischer
10 Systeme bezüglich mehrerer Kriterien bekannt, bei der neben Gewichtungsfaktoren für die Zielfunktionen noch Lagrange-Multiplikatoren für die Berücksichtigung von Nebenbedingungen verwendet werden. Der Nachteil dieses Verfahren besteht darin, dass eine Interaktion mit dem Benutzer nötig ist und die-
15 ses Verfahren diesbezüglich nicht automatisiert werden kann.

Somit liegt der Erfindung die **Aufgabe** zugrunde, ein automatisiertes und numerisch effizientes Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems zu schaffen.

20

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich auch aus den abhängigen Patentansprüchen.

25 Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems wird das technische System durch eine vorgegebene Menge von Zielfunktionen, die von Parametern abhängen, modelliert. Dabei wird jede einzelne Zielfunktion mit einem Gewichtungsfaktor gewichtet. Das Verfahren löst ein Gleichungssystem umfassend die Parameter und die Gewichtungsfak-
30 toren als Variablen in einem Variablenraum, wobei Lösungen des Gleichungssystems Arbeitspunkte eines Lösungsraums im Variablenraum bilden. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden die Arbeitspunkte mittels eines Prädiktor-Korrektor-
35 Verfahrens bestimmt, bei dem ausgehend von einem ersten Arbeitspunkt ein Prädiktor, der mittels einer stochastischen Größe erzeugt wird, im Variablenraum bestimmt wird und an-

schließlich in einem Korrektorschritt ein zweiter Arbeitspunkt ermittelt wird. Die ermittelten Arbeitspunkte werden dabei zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt. Bei dem Entwurf des technischen Systems kann es sich um einen Neuentwurf oder um eine Veränderung bzw. Anpassung eines bereits bestehenden technischen Systems handeln.

Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, dass das Verfahren durch die Erzeugung des Prädiktors mittels einer stochastischen Größe automatisiert wird und somit kein Eingriff des Benutzers mehr erforderlich ist. Durch die Kopplung des numerischen Prädiktor-Korrektor-Verfahrens mit stochastischen Methoden wird ein effizienter Einsatz der Rechner-Ressourcen zur Berechnung von Arbeitspunkten eines technischen Systems gewährleistet.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird der Prädiktor mittels Zufallszahlen vorgegeben, so dass insbesondere beim Ablauf des Verfahrens ein Zufallszahlengenerator eingesetzt werden kann und somit auf einfache Weise die Automatisierung des Verfahrens gewährleistet ist.

In einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung sind die Zufallszahlen normalverteilt. Hierdurch wird erreicht, dass die Trajektorie von Arbeitspunkten, die sich im Lösungsraum beim Ablauf des Verfahrens bildet, im gesamten Lösungsraum eine Gleichverteilung und somit gute Abdeckung aller möglichen Arbeitspunkte gewährleistet. Durch die Verwendung von normalverteilten Zufallszahlen kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren insbesondere eine Brownsche Bewegung auf dem Lösungsraum modelliert werden.

Vorzugsweise sind die Arbeitspunkte, die durch das erfindungsgemäße Verfahren ermittelt werden, sog. pareto-optimale Punkte, die in Bezug auf alle Zielfunktionen nicht mehr weiter optimierbar sind. Insbesondere werden bei dem erfindungs-

gemäßes Verfahren als Arbeitspunkte die Punkte mit positiven Gewichtungsfaktoren im Lösungsraum ausgewählt.

5 In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung müssen die Arbeitspunkte ferner eine oder mehrere Nebenbedingungen erfüllen, wobei die oder jede Nebenbedingung durch eine weitere Variable des Gleichungssystems im Variablenraum repräsentiert wird. Die Nebenbedingungen können dabei Gleichheitsnebenbedingungen und/oder Ungleichheitsnebenbedingungen
10 sein. Bei Ungleichheitsnebenbedingungen wird vorzugsweise eine Schlupfvariable eingeführt, mit der die Ungleichheitsnebenbedingungen in Gleichheitsnebenbedingungen umgeformt werden können. Die Verwendung von Schlupfvariablen wird in der detaillierten Beschreibung eines Ausführungsbeispiels noch
15 näher erläutert.

Vorzugsweise ist der Lösungsraum der Arbeitspunkte eine Mannigfaltigkeit, insbesondere eine Untermannigfaltigkeit im Variablenraum. In [3] ist erläutert, unter welchen Voraussetzungen der Lösungsraum eine solche Mannigfaltigkeit bildet.
20

Da insbesondere beim Start des erfindungsgemäßen Verfahrens zunächst ein erster Arbeitspunkt vorliegt, wird in einer besonderen Ausgestaltung der Erfindung dieser erste gültige Arbeitspunkt durch eine Wichtungsmethode bestimmt, wobei die
25 Verwendung von Wichtungsmethoden bereits aus dem Stand der Technik bekannt ist (siehe [1]).

Bei dem in der Erfindung verwendeten Prädiktor-Korrektor-Verfahren wird vorzugsweise in dem ersten Arbeitspunkt eine Tangentialebene an den Lösungsraum bestimmt, und anschließend wird in dieser Tangentialebene der Prädiktor festgelegt.
30

In einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird
35 beim Auftreten eines negativen Prädiktors mit einem oder mehreren negativen Gewichtungsfaktoren ein neuer Prädiktor durch eine Reflexion an einer Unterebene des Lösungsraums der gültigen

tigen Arbeitspunkte bestimmt. Hierdurch können neue Regionen von gültigen Arbeitspunkten ermittelt werden, wobei diese Arbeitspunkte für den Anwender hinsichtlich von geheimen Zusatzkriterien oder seinem Expertenwissen von besonderer Relevanz sein können.

10 In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird bei dem Reflexionsschritt ein Schnittpunkt der Trajektorie, die zwischen dem ersten Arbeitspunkt und dem negativen Prädiktor verläuft, mit einer Unterebene des Lösungsraums bestimmt. Dann wird der Tangentialanteil des von dem Schnittpunkt und dem negativen Prädiktor aufgespannten Vektors an die betreffende Unterebene des Lösungsraums ermittelt, wobei in den Punkten der Unterebene diejenigen Gewichtungsfaktoren, die
15 für den negativen Prädiktor negativ waren, nunmehr gleich Null sind. Anschließend wird der zu diesem Tangentialanteil gehörige Normalanteil des von dem Schnittpunkt und dem negativen Prädiktor aufgespannten Vektors bestimmt. Schließlich wird der neue Prädiktor durch zweimalige Subtraktion des Normalanteils vom negativen Prädiktor ermittelt.
20

Für das in der Erfindung verwendete Korrektungsverfahren wird vorzugsweise ein aus dem Stand der Technik bekanntes Newton-Verfahren eingesetzt, welches numerisch leicht umsetzbar ist.

Vorzugsweise werden die Arbeitspunkte durch Iterationen des Prädiktor-Korrektor-Verfahrens bestimmt, wobei in einem Iterationsschritt als erster Arbeitspunkt des Prädiktor-Korrektor-Verfahrens der zweite Arbeitspunkt des vorangegangenen Iterationsschritts verwendet wird. Das Verfahren wird dabei beispielsweise durch eine Abbruchbedingung beendet. Die Abbruchbedingung ist in einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung dann erfüllt, wenn eine vorgegebene Anzahl von Arbeitspunkten ermittelt worden ist und/oder ein vorgegebenes
30
35 Zeitlimit erreicht worden ist.

Neben dem oben beschriebenen Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems betrifft die Erfindung auch eine Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems, mit der das oben beschriebene Verfahren durchführbar ist. Insbesondere umfasst
5 das Verfahren eine Prozessoreinheit, mit der es ermöglicht wird, dass der Prädiktor mittels einer stochastischen Größe erzeugbar ist.

Vorzugsweise umfasst die Anordnung einen Zufallszahlengenerator zur Erzeugung von Zufallszahlen, welche die stochastische
10 Größe darstellen.

Auch kann die Erfindung oder jede vorstehend beschriebene Weiterbildung durch ein Computerprogrammerzeugnis realisiert
15 sein, welches ein Speichermedium aufweist, auf welchem ein Computerprogramm gespeichert ist, das auf einem Rechner ablaufbar ist und die Erfindung ausführt.

20 Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen dargestellt und erläutert.

Es zeigen

25 Fig.1 ein Ablaufdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Entwurf eines technischen Systems;

Fig.2 eine Skizze, die das in der Erfindung verwendete Prädiktor-Korrektor-Verfahren veranschaulicht;

30

Fig.3 eine Skizze, welche das in einer Abwandlung der Erfindung verwendete Reflexionsverfahren veranschaulicht und

35 Fig. 4 eine Prozessoreinheit zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

In **Fig.1** ist ein Ablaufdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Entwurf eines technischen Systems gezeigt.

5 Zuerst wird im Schritt 101 eine Beschreibungsform des technischen Systems gewählt. Diese Beschreibungsform umfasst eine vorgegebene Anzahl k von Zielfunktionen $\underline{f}=(f_1, \dots, f_k)$, wobei die Zielfunktionen jeweils von n vorgegebenen Parametern x_1 bis x_n des technischen Systems abhängen. Bei den Zielfunktionen
10 handelt es sich beispielsweise um die Investitionskosten f_1 und den Wirkungsgrad f_2 des technischen Systems. Die Zielfunktionen werden in diesem Fall durch folgende Gleichung beschrieben

$$15 \quad \underline{f}(\underline{x}) = \begin{pmatrix} f_1(\underline{x}) \\ f_2(\underline{x}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Investitionskosten}(\underline{x}) \\ -\text{Wirkungsgrad}(\underline{x}) \end{pmatrix}$$

mit $\underline{x}=(x_1, \dots, x_n)$.

Bei den Parametern x_1 bis x_n kann es sich um Auslegungsparameter oder Betriebsparameter des technischen Systems handeln.
20

Durch das erfindungsgemäße Verfahren werden die gültigen Arbeitspunkte, die zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt werden, durch die Optimierung der Zielfunktionen hinsichtlich der Parameter bestimmt, wobei sich nicht alle Zielfunktionen f_1 bis f_k gleichzeitig optimieren lassen, da die Optimierungskriterien i.a. miteinander in Konkurrenz stehen.

Das technische System ist in den gültigen Arbeitspunkten ferner durch eine vorgegebene Anzahl m an Nebenbedingungen
30 $\underline{h}=(h_1(\underline{x}), \dots, h_m(\underline{x}))$ beschränkt, die sich durch folgende Gleichung ausdrücken lassen:

$$\underline{h}(\underline{x}) = 0$$

wobei $\underline{0} = (0, \dots, 0)$ einen Nullvektor darstellt. Es handelt sich hierbei um eine Gleichheitsnebenbedingung, wobei alternativ auch eine Ungleichheitsnebenbedingung in Betracht kommen kann. Eine solche Ungleichheitsbedingung lautet beispielsweise:

$$\underline{h}(\underline{x}) < \underline{0} \quad \text{oder} \quad \underline{h}(\underline{x}) > \underline{0} .$$

Zur Lösung des Optimierungsproblems mit Ungleichheitsnebenbedingungen werden eine Anzahl m von Schlupfvariablen $s = (s_1, \dots, s_m)$ eingeführt, durch welche die Ungleichheitsnebenbedingungen in folgende Gleichheitsnebenbedingungen umgeformt werden können:

$$\underline{h}(\underline{x}) + \underline{s} = \underline{0} \quad \text{oder} \quad \underline{h}(\underline{x}) - \underline{s} = \underline{0} .$$

Bei dem in der vorliegenden Ausführungsform der Erfindung beschriebenen Optimierungsverfahren sind die gültigen Arbeitspunkte sog. pareto-optimale Punkte, welche folgende Bedingung erfüllen:

$$\min_{\underline{x} \in R} \{ \underline{f}(\underline{x}) \}, R = \{ \underline{x} \in \mathfrak{R}^n \mid \underline{h}(\underline{x}) = \underline{0} \}$$

Es lässt sich zeigen, dass die Lösungen dieses Optimierungsproblems die Lösungen des folgenden nichtlinearen Gleichungssystems sind:

$$F(\underline{x}, \underline{\lambda}, \underline{\alpha}) = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \nabla f_i(\underline{x}) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \nabla h_j(\underline{x}) \\ \underline{h}(\underline{x}) \\ \sum_{i=1}^k \alpha_i - 1 \end{pmatrix} = \underline{0} .$$

Hierbei werden die Nebenbedingungen durch die Lagrange-Multiplikatoren $\underline{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ berücksichtigt, und die Zielfunktionen f_i werden mit Gewichtungsfaktoren α_i gewichtet, wobei zu beachten ist, dass die Summe aller Gewichtungsfaktoren

ren auf eins normiert ist, d.h. $\sum_{i=1}^k \alpha_i - 1 = 0$. Insbesondere können dabei die einzelnen Gewichtungsfaktoren α_i auch negativ oder gleich null sein. Die Lösungen des Optimierungsproblems sind somit Vektoren $(\underline{x}, \underline{\lambda}, \underline{\alpha})$ im $(n+m+k)$ -dimensionalen Variablenraum des obigen Gleichungssystems.

Wie in [3] gezeigt, beschreiben die Lösungen dieses Gleichungssystems unter bestimmten Voraussetzungen eine $(k-1)$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit M im Variablenraum.

Die nachfolgend beschriebenen numerischen Schritte zur Bestimmung von gültigen Arbeitspunkten beruhen im wesentlichen auf dem in [3] beschriebenen Homotopie-Verfahren, bei dem ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren zur Bestimmung von pareto-optimalen Punkten verwendet wird.

In dem Schritt 102 wird ausgehend von der Beschreibungsform 101 des technischen Systems ein erster pareto-optimaler Punkt z mit einem Standardverfahren, wie z.B. der Wichtungsmethode, bestimmt.

In diesem ersten pareto-optimalen Punkt wird im nächsten Schritt 103 eine $(k-1)$ -dimensionale Tangentialebene $T_z M$ an die Mannigfaltigkeit M der gültigen Arbeitspunkte im Punkt z bestimmt. Dazu wird eine Jacobi-Matrix des Gleichungssystems F in dem Punkt z einer QR-Faktorisierung unterworfen. Daraus wird dann eine Orthonormalbasis $\{ \underline{q}_1 \dots \underline{q}_{k-1} \}$ bestimmt, welche die Tangentialebene aufspannt. Die hierbei durchgeführten einzelnen numerischen Schritte sind detailliert in [3] beschrieben.

In dem nächsten Schritt 104 wird in dieser Tangentialebene ein Prädiktor y bestimmt, wobei der Prädiktor - im Gegensatz zu dem in [3] beschriebenen Homotopieverfahren - mittels eines normalverteilten Zufallszahlenvektors b der Dimension $k-1$

in der Tangentialebene erzeugt wird. Der Prädiktor y hat dabei folgende Form:

$$y = z + (q_1 \dots q_{k-1})b$$

5

Durch die Verwendung eines solchen Zufallszahlenvektors kann eine Brownsche Bewegung auf der Untermannigfaltigkeit M modelliert werden, wobei sich die Brownsche Bewegung näherungsweise wie folgt darstellen lässt:

10

$$dZ_t = \varepsilon P(Z_t) dB_t$$

wobei

15

$P(z)$ eine Projektionsmatrix auf die Tangentialebene $T_z M$ im gültigen Arbeitspunkt z ist,

ε ein Skalierungsfaktor ist, und

$B_t, t \in \mathbb{R}_0^+$ eine Brownsche Bewegung im Variablenraum ist.

20

Zur Modellierung dieser Bewegung wird für b die $k-1$ -dimensionale Normalverteilung $N(0_{k-1}, t_\Delta \varepsilon I_{k-1})$ gewählt, wobei der Mittelwert 0_{k-1} der $(k-1)$ -dimensionale Nullvektor ist und die Varianz die $(k-1)$ -dimensionale Identitätsmatrix I_{k-1} multipliziert mit einer Schrittweite t_Δ der Brownschen Bewegung und dem Skalierungsfaktor ε ist.

25

30

Alternativ kann der Prädiktor dadurch bestimmt werden, dass zunächst im $(m+n+k)$ -dimensionalen Variablenraum ein normalverteilter Zufallszahlenvektor bestimmt wird und dieser anschließend in die $(k-1)$ -dimensionale Tangentialebene $T_z M$ projiziert wird.

Danach wird im Schritt 105 der Prädiktor mit Hilfe eines Korrektorverfahrens, das beispielsweise ein numerisches Newton-Verfahren ist, auf die Mannigfaltigkeit der pareto-optimalen Punkte projiziert. Auf diese Weise wird ein neuer gültiger
5 Arbeitspunkt auf der Mannigfaltigkeit der pareto-optimalen Punkte ermittelt.

Die Schritte 103, 104 und 105 werden iterativ wiederholt, wobei als Ausgangspunkt zur Berechnung eines neuen gültigen Arbeitspunktes der im vorangegangenen Iterationsschritt bestimmte Arbeitspunkt verwendet wird.
10

Im Schritt 106 wird überprüft, ob ein Abbruchkriterium erfüllt ist, d.h. ob z.B. eine vorgegebene Anzahl von Iterationen durchgeführt oder ein vorgegebenes Zeitlimit erreicht
15 worden ist. Ist dies nicht der Fall, so wird zu Schritt 103 zurückgegangen und die nächste Iteration durchgeführt. Dies wird solange fortgesetzt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist.

20

Ist das Abbruchkriterium in Schritt 106 erfüllt, so wird in einem nächsten Schritt 107 die Menge der bestimmten pareto-optimalen Punkte auf diejenigen Punkte beschränkt, bei denen die Gewichtungsfaktoren α_1 positiv sind.

Aus diesen pareto-optimalen Punkten wird in einem letzten Schritt 108 durch den Benutzer ein für seine Anforderungen effizienter Arbeitspunkt des technischen Systems ausgewählt und das technische System mit diesem effizienten Arbeitspunkt
30 entworfen.

Figur 2 zeigt eine zweidimensionale grafische Darstellung des in der Erfindung verwendeten Prädiktor-Korrektor-Verfahrens. In Figur 2 bezeichnet z^i einen pareto-optimalen Punkt auf der
35 Untermannigfaltigkeit M , wobei dieser Punkt im i -ten Iterationsschritt des Verfahrens erhalten wurde. Zur Bestimmung eines neuen pareto-optimalen Punktes wird zunächst die Tangen-

tialebene $T_{zi}M$ an die Untermannigfaltigkeit M im Punkt z^i bestimmt. Die Tangentialebene ist in Figur 2 mit gestrichelten Linien angedeutet. In dem nächsten Schritt 104 wird dann unter Verwendung von normalverteilten Zufallszahlen in der Tangentialebene $T_{zi}M$ ein Prädiktorpunkt y^{i+1} bestimmt. In dem anschließenden Korrektorschritt 105, der beispielsweise ein Newton-Verfahren sein kann, wird dann der neue pareto-optimale Punkt z^{i+1} ermittelt. Das Verfahren wird dann fortgesetzt, wobei als Ausgangspunkt für den erneuten Prädiktorschritt der pareto-optimale Punkt z^{i+1} verwendet wird.

Figur 3 betrifft eine Abwandlung des erfindungsgemäßen Verfahrens, wobei beim Auftreten von Prädiktoren mit negativen Gewichtungsfaktoren α_i eine Reflexion zur Ermittlung eines neuen Prädiktors mit positiven α_i durchgeführt wird. Figur 3 zeigt in einer dreidimensionalen Darstellung die Durchführung dieses Projektionsschrittes.

In Figur 3 ist ein Fall gezeigt, bei dem ausgehend von einem pareto-optimalen Punkt z ein Prädiktor y_{neg} ermittelt wird, der ein negatives α_i aufweist. Dies wird grafisch dadurch veranschaulicht, dass die Strecke zwischen dem Punkt z und dem Punkt y die Tangentialebene T_zM im Punkt S durchstößt. Der Punkt S liegt dabei wiederum auf einer Unterebene der Tangentialebene T_zM , für deren Punkte die Koordinate α_i den Wert Null aufweist. Zur Durchführung der Reflexion wird zunächst der Schnittpunkt S bestimmt. Dies kann unter der Verwendung eines Projektionsoperators erfolgen, der die α_i -Komponente aus einer Parameterdarstellung der durch die Punkte z und y verlaufenden Geraden herausprojiziert. Nach Bestimmung des Punktes S kann nunmehr der zwischen S und y verlaufende Vektor x_{neg} ermittelt werden. Dieser Vektor wird dann in den Tangentialanteil t an die Unterebene und in einen Normalanteil n zerlegt. Für den Tangentialanteil gilt somit $t = x_{neg} - n$. Anschließend wird der Reflexionsschritt durchgeführt, wobei der neue reflektierte Vektor x_{neu} den gleichen Tangentialanteil t wie der alte Vektor x_{neg} aufweist und der

Normalanteil dem Normalanteil n des alten Vektors x_{neg} mit umgekehrten Vorzeichen entspricht. Der neue Vektor lautet somit $x_{neu} = t - n = (x_{neg} - n) - n = x_{neg} - 2n$. Es ergibt sich somit ein neuer Prädiktor y_{neu} , der an der Tangentialebene T_2M reflektiert wurde. Für den neuen Prädiktorpunkt y_{neu} gilt

$y_{neu} = S + x_{neu}$. Die oben beschriebene Reflexionsmethode steigert die numerische Effizienz des Verfahrens, da die Erzeugung von Punkten mit negativen Gewichtungsfaktoren α_i vermieden wird und damit die rechentechnischen Ressourcen effizienter genutzt werden.

In **Fig.4** ist eine Prozessoreinheit PRZE zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. Die Prozessoreinheit PRZE umfasst einen Prozessor CPU, einen Speicher MEM und eine Input/Output-Schnittstelle IOS, die über ein Interface IFC auf unterschiedliche Art und Weise genutzt wird: Über eine Grafikschnittstelle wird eine Ausgabe auf einem Monitor MON sichtbar und/oder auf einem Drucker PRT ausgegeben. Eine Eingabe erfolgt über eine Maus MAS oder eine Tastatur TAST. Auch verfügt die Prozessoreinheit PRZE über einen Datenbus BUS, der die Verbindung von einem Speicher MEM, dem Prozessor CPU und der Input/Output-Schnittstelle IOS gewährleistet. Weiterhin sind an den Datenbus BUS zusätzliche Komponenten anschließbar, z.B. zusätzlicher Speicher, Datenspeicher (Festplatte) oder Scanner.

Literaturverzeichnis:

- [1] C. Hillermeier: "Nonlinear Multiobjective Optimization: A Generalized Homotopy Approach", Kapitel 3.2, Birkhäuser Verlag, 2001
- 5 [2] C. Hillermeier: "Nonlinear Multiobjective Optimization: A Generalized Homotopy Approach", Kapitel 3.3, Birkhäuser Verlag, 2001
- 10 [3] C. Hillermeier: "A Generalized Homotopy Approach to Multiobjective Optimization", Journal of Optimization Theory and Application, Vol. 110/3, pp. 557 - 583, Plenum Press, New York, 2001

Patentansprüche

1. Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems,

- 5 - bei dem das technische System eine vorgegebene Menge
 von Zielfunktionen, die von Parametern abhängen, um-
 fasst;
- 10 - bei dem jede einzelne Zielfunktion mit einem Gewich-
 tungsfaktor gewichtet wird;
- 15 - bei dem ein Gleichungssystem umfassend die Parameter
 und die Gewichtungsfaktoren als Variablen in einem
 Variablenraum gelöst wird;
- 20 - bei dem die Lösungen des Gleichungssystems Arbeits-
 punkte eines Lösungsraums im Variablenraum bilden;
- bei dem die Arbeitspunkte mittels eines Prädiktor-
 Korrektor-Verfahrens bestimmt werden, bei dem ausge-
 hend von einem ersten Arbeitspunkt ein Prädiktor, der
 mittels einer stochastischen Größe erzeugt wird, im
 Variablenraum bestimmt wird und anschließend in einem
 Korrektorschritt ein zweiter Arbeitspunkt ermittelt
 wird;
- bei dem die Arbeitspunkte zum Entwurf des technischen
 Systems eingesetzt werden.

30

2. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Prädiktor mittels Zufallszahlen bestimmt wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Zufallszahlen normalverteilt sind.

35

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die stochastische Größe ein stochastischer Prozess Z_t ist, der folgende Gleichung erfüllt:

$$dZ_t = \varepsilon P(Z_t) dB_t$$

wobei

$P(z)$ eine Projektionsmatrix auf den Tangentialraum des Lösungsraums im gültigen Arbeitspunkt z ist,

ε ein Skalierungsfaktor ist, und

$B_t, t \in \mathbb{R}_0^+$ eine Brownsche Bewegung im Variablenraum ist.

15

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Arbeitspunkte pareto-optimale Punkte ermittelt werden.

20

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Arbeitspunkte die Punkte mit positiven Gewichtungsfaktoren im Lösungsraum sind.

25

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Arbeitspunkte eine oder mehrere Nebenbedingungen erfüllen, wobei die oder jede Nebenbedingung durch eine weitere Variable des Gleichungssystems im Variablenraum repräsentiert wird.

30

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die Nebenbedingungen Gleichheitsnebenbedingungen und/oder Ungleichheitsnebenbedingungen sind.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem Ungleichheitsnebenbedingungen mittels einer Schlupfvariable in Gleichheitsnebenbedingungen umgeformt werden.
- 5 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Lösungsraum eine Mannigfaltigkeit, insbesondere eine Untermannigfaltigkeit im Variablenraum ist.
- 10 11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der erste Arbeitspunkt durch eine Wichtungsmethode bestimmt wird.
- 15 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in dem ersten Arbeitspunkt eine Tangentialebene an den Lösungsraum bestimmt wird und in dieser Tangentialebene der Prädiktor festgelegt wird.
- 20 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem beim Auftreten eines negativen Prädiktors mit einem oder mehreren negativen Gewichtungsfaktoren ein neuer Prädiktor durch eine Reflexion an einer Unterebene des Lösungsraums der Arbeitspunkte bestimmt wird.
- 30 14. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem
- ein Schnittpunkt der Trajektorie, die zwischen dem ersten Arbeitspunkt und dem negativen Prädiktor verläuft, mit der Unterebene des Lösungsraums bestimmt wird;
 - der Tangentialanteil des von dem Schnittpunkt und dem negativen Prädiktor aufgespannten Vektors an einer Unterebene des Lösungsraums ermittelt wird, wobei in den Punkten der Unterebene diejenigen Gewichtungsfaktoren, die für den negativen Prädiktor negativ waren, gleich Null sind;
- 35

- der zum Tangentialanteil gehörige Normalanteil des von dem Schnittpunkt und dem negativen Prädiktor aufgespannten Vektors bestimmt wird;

- 5 - der neue Prädiktor durch zweimalige Subtraktion des Normalanteils vom negativen Prädiktor bestimmt wird.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Korrektungsverfahren ein Newton-Verfahren ist.

10

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Arbeitspunkte durch Iterationen des Prädiktor-Korrektor-Verfahrens bestimmt werden, wobei in einem Iterationsschritt als erster Arbeitspunkt des Prädiktor-Korrektor-Verfahrens der zweite Arbeitspunkt des vorangegangenen Iterationsschritts verwendet wird.

15

17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Verfahren durch eine Abbruchbedingung beendet wird.

20

18. Verfahren nach Anspruch 17, bei dem die Abbruchbedingung erfüllt ist, wenn eine vorgegebene Anzahl von Arbeitspunkten ermittelt worden ist und/oder ein vorgegebenes Zeitlimit erreicht worden ist.

25

19. Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer Prozessoreinheit, die derart eingerichtet ist, dass

30

- das technische System eine vorgebbare Menge von Zielfunktionen, die von Parametern abhängen, umfasst;

35

- jede einzelne Zielfunktion mit einem Gewichtungsfaktor gewichtet ist;

19

- ein Gleichungssystem umfassend die Parameter und die Gewichtungsfaktoren als Variablen in einem Variablenraum gelöst werden kann;

5 - die Lösungen des Gleichungssystems Arbeitspunkte eines Lösungsraums im Variablenraum bilden;

10 - die Arbeitspunkte mittels eines Prädiktor-Korrektor-Verfahrens bestimmbar sind, bei dem ausgehend von einem ersten Arbeitspunkt ein Prädiktor, der mittels einer stochastischen Größe erzeugt wird, im Variablenraum bestimmt wird und anschließend in einem Korrektorschritt ein zweiter Arbeitspunkt ermittelt wird;

15 - die Arbeitspunkte zum Entwurf des technischen Systems einsetzbar sind.

20 20. Anordnung nach Anspruch 19, umfassend einen Zufallszahlengenerator zur Erzeugung der stochastischen Größe.

21. Computerprogrammerzeugnis, welches ein Speichermedium aufweist, auf welchem ein Computerprogramm gespeichert ist, das auf einem Rechner ablaufbar ist und mit dem das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 durchführbar ist.

Zusammenfassung

Verfahren und Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems.

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems, bei dem das technische System durch eine vorgegebene Menge von Zielfunktionen, die von Parametern abhängen, modelliert wird. Dabei wird jede einzelne Zielfunktion mit einem Gewichtungsfaktor gewichtet. Das Verfahren löst ein Gleichungssystem umfassend die Parameter und die Gewichtungsfaktoren als Variablen in einem Variablenraum, wobei Lösungen des Gleichungssystems Arbeitspunkte eines Lösungsraums im Variablenraum bilden. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden die Arbeitspunkte mittels eines Prädiktor-Korrektor-Verfahrens bestimmt, bei dem ausgehend von einem ersten Arbeitspunkt ein Prädiktor, der mittels einer stochastischen Größe erzeugt wird, im Variablenraum bestimmt wird und anschließend in einem Korrektorschritt ein zweiter Arbeitspunkt ermittelt wird. Die ermittelten Arbeitspunkte werden dabei zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt. Bei dem Entwurf des technischen Systems kann es sich um einen Neuentwurf oder um eine Veränderung bzw. Anpassung eines bereits bestehenden technischen Systems handeln.

25

Figur 1

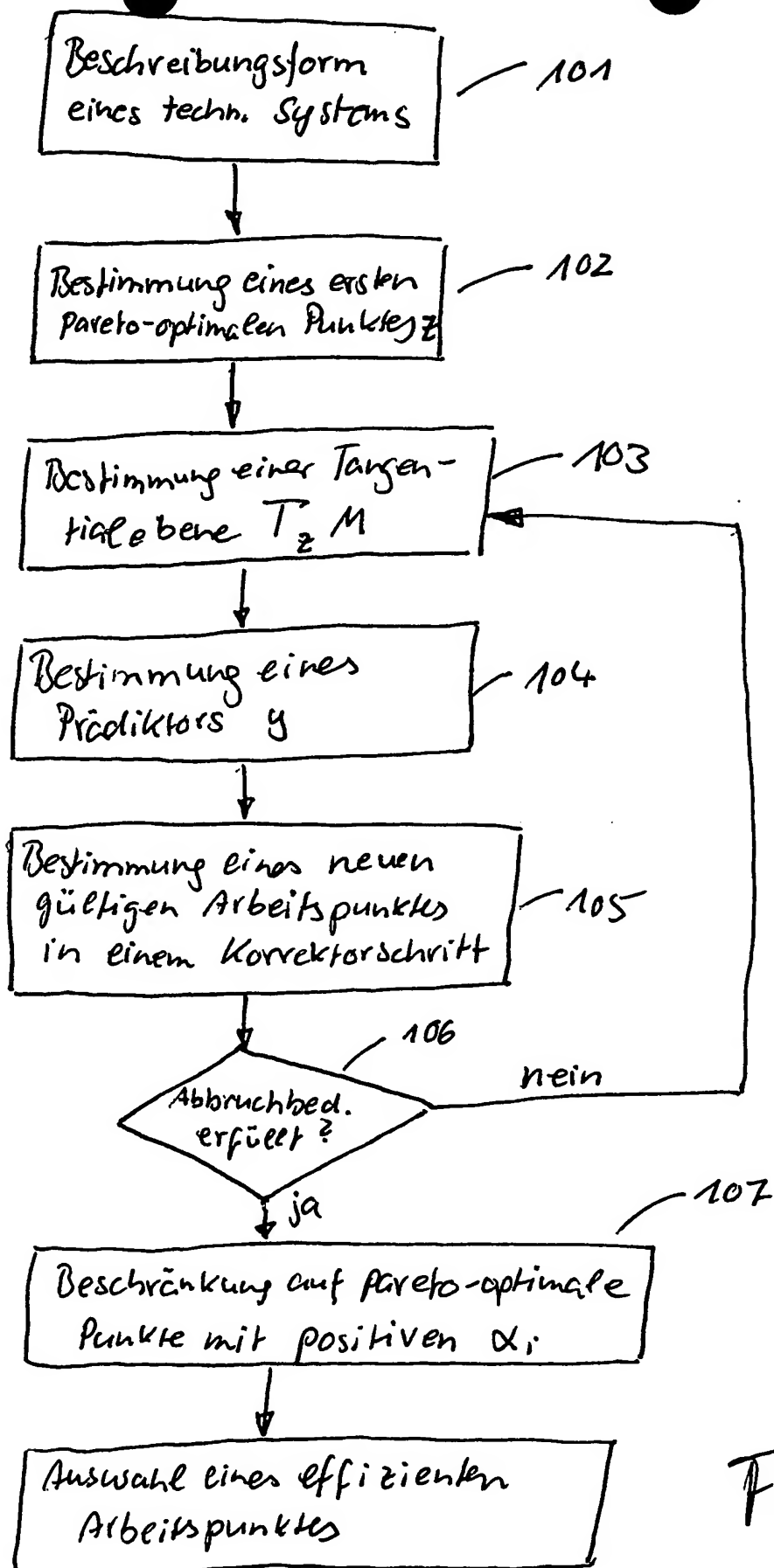


Fig. 1

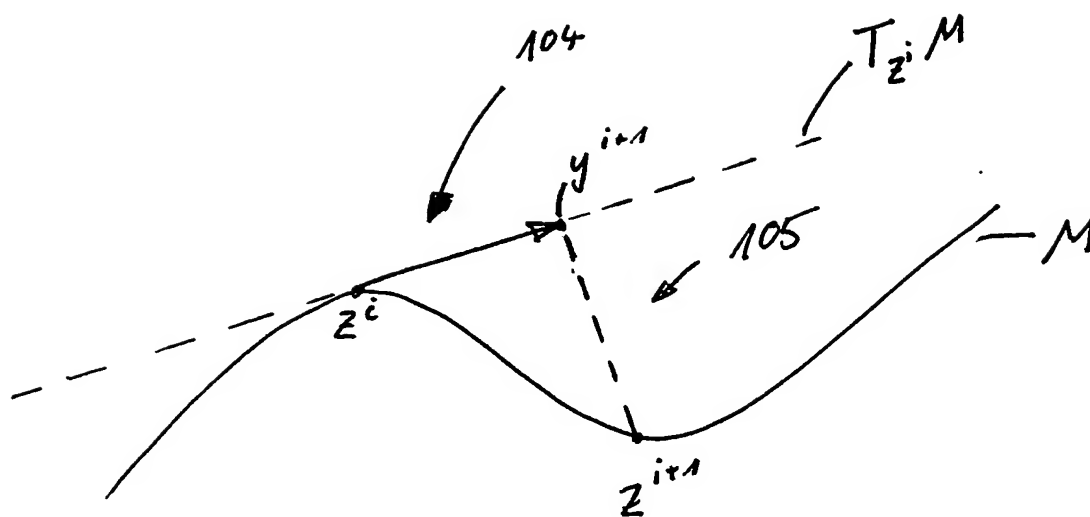


Fig. 2

Unterebene mit
 $\alpha_i = 0$

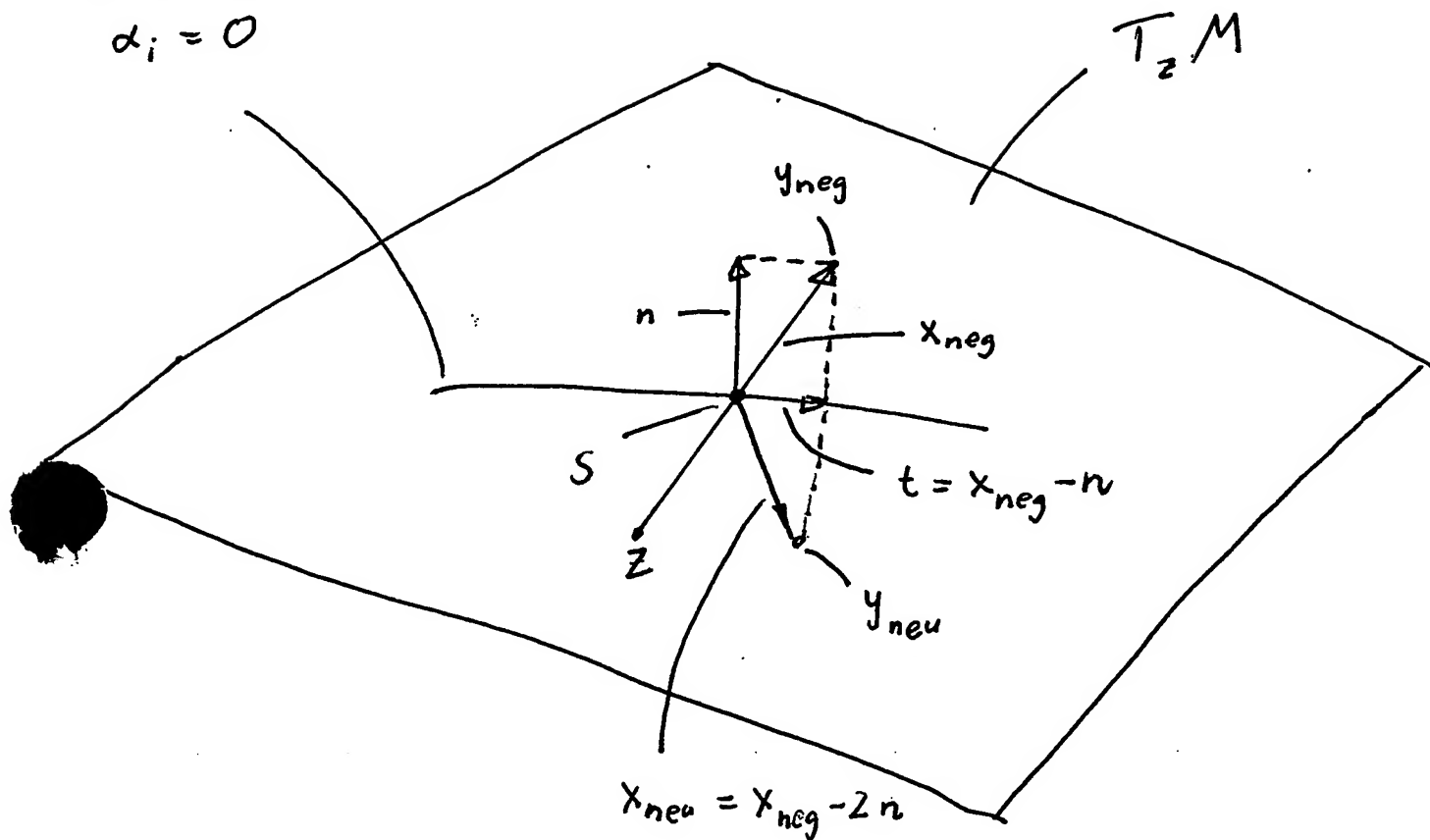
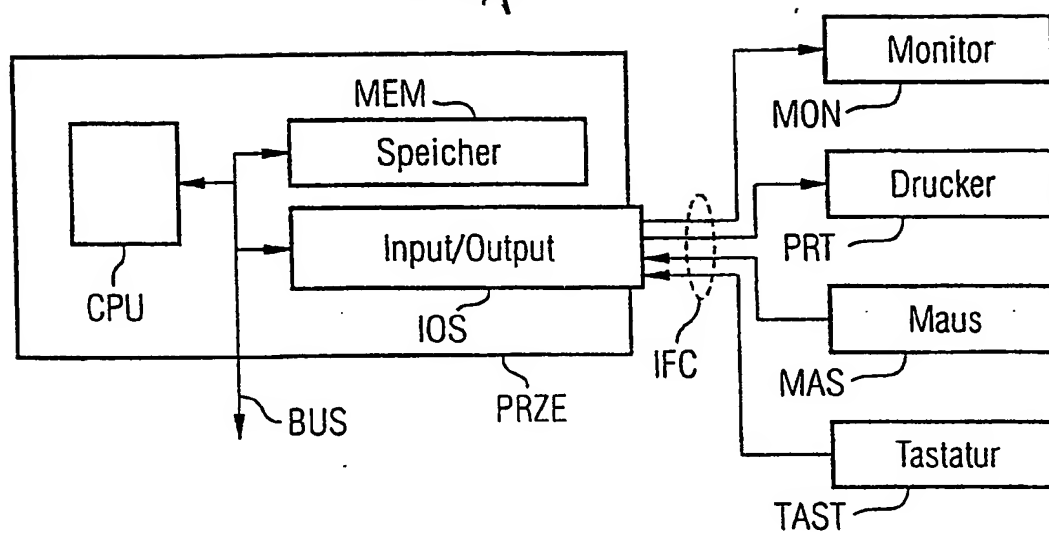


Fig. 3

FIG 2/4



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.